



地層処分研究開発・評価委員会

資料4-4 (H19. 11. 27)

# 地層処分技術に関する 知識マネジメントシステム —全体概要—

平成19年11月27日

独立行政法人日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門

知識化グループ

梅木 博之



## 説明の内容

- 地層処分における知識マネジメントの必要性
- セーフティケースをターゲットとした知識マネジメントシステム
- 知識マネジメントシステムのインテリジェント化
- 知識マネジメントの方法論
- ツールの開発

- 知識マネジメントシステムの必要性
  - 情報の爆発的増加
  - 異なる分野間の多数の関連性を考慮した統合プロセスの複雑さの増大
  - 長期間にわたる処分計画に対する地層処分技術の継続的な信頼性向上のための研究開発管理

- 知識
  - 地層処分プロジェクトを支える全ての科学技術(社会科学, 経済学, 医学などを暗に内包)を示す広範な意味で使用
- 知識ベース
  - 種々の媒体(文書, 電子ファイルなど)によって体系的に保存し必要に応じて直ちに取りだせるようにされている様々な知識
- 知識マネジメント
  - 知識ベースを構築, 保存, 更新, 伝達, 共有するとともに知識の作成と活用を支援するための行為
- 知識マネジメントシステム(KMS)
  - 知識マネジメント機能 + 知識ベース

## 学際的な研究開発





# 情報爆発 (information explosion)

- 従来型知識マネジメント
  - 編集と記録: 文書とデータベース
  - 構造化と保存: ライブラリとアーカイブ
  - 品質管理: 整合性チェックとピアレビュー
  - 統合と計画: 専門家グループ
- 年報, 特定テーマのレビュー, 研究開発計画などに集約
- 基本的な枠組みは文明の発生と同時に形成, 現代までほとんど変わらない: 専門家グループの役割が重大

## 2002年のデータ:

- 新規情報生成量 - **5 EB**
- 電子的媒体へのデータ保存 - **92%**
- 年間の電子情報フロー - **18 EB**
- **指数関数的増加**: 倍加時間約3年  
(10年間で1桁増加)

キロバイト (kB):  $10^3$  bytes

2 kB: タイプ原稿1ページ分

メガバイト (MB):  $10^6$  bytes

5 MB: シェークスピアの全著作

ギガバイト (GB)  $10^9$  bytes

100 GB: 学術雑誌の図書館1フロア分

テラバイト (TB)  $10^{12}$  bytes

10 TB: 米国議会図書館収集の全印刷物

ペタバイト (PB)  $10^{15}$  bytes

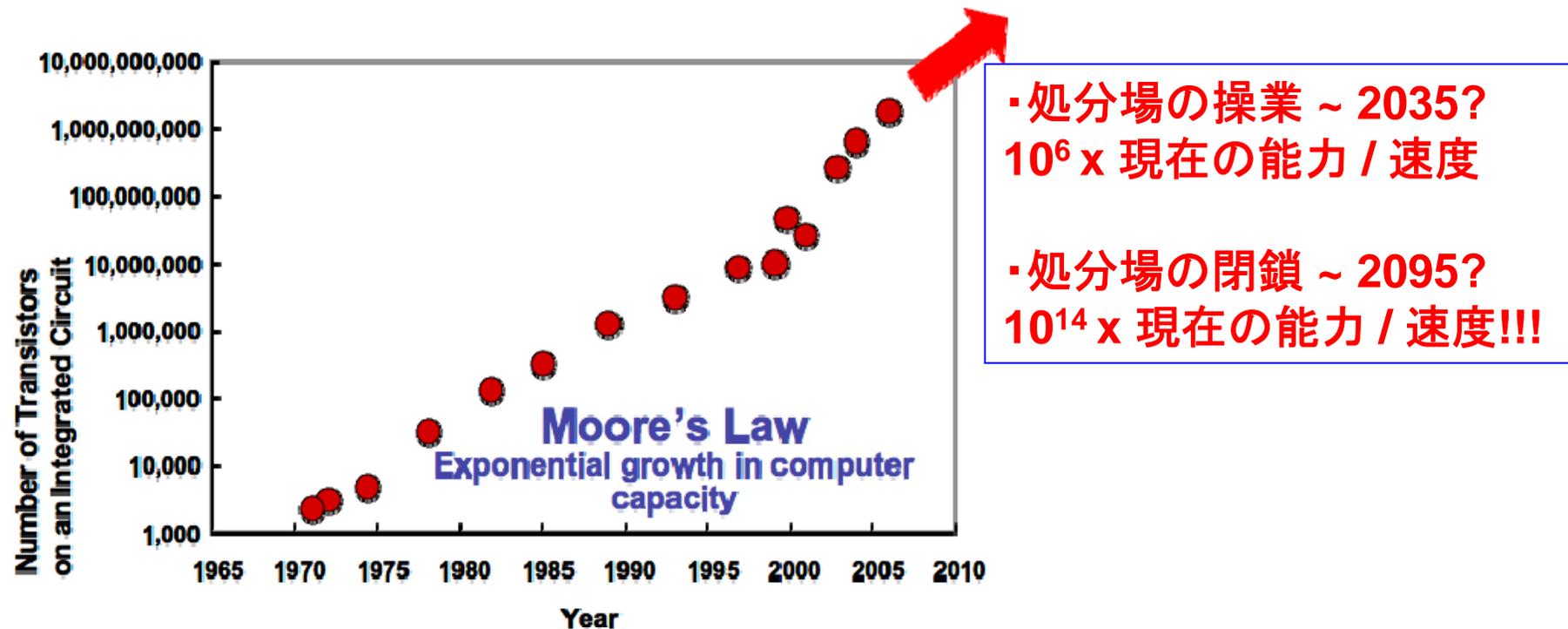
200 PB: 全印刷物

エクサバイト (EB)  $10^{18}$  bytes

5 EB: 人類がこれまで話したすべての単語

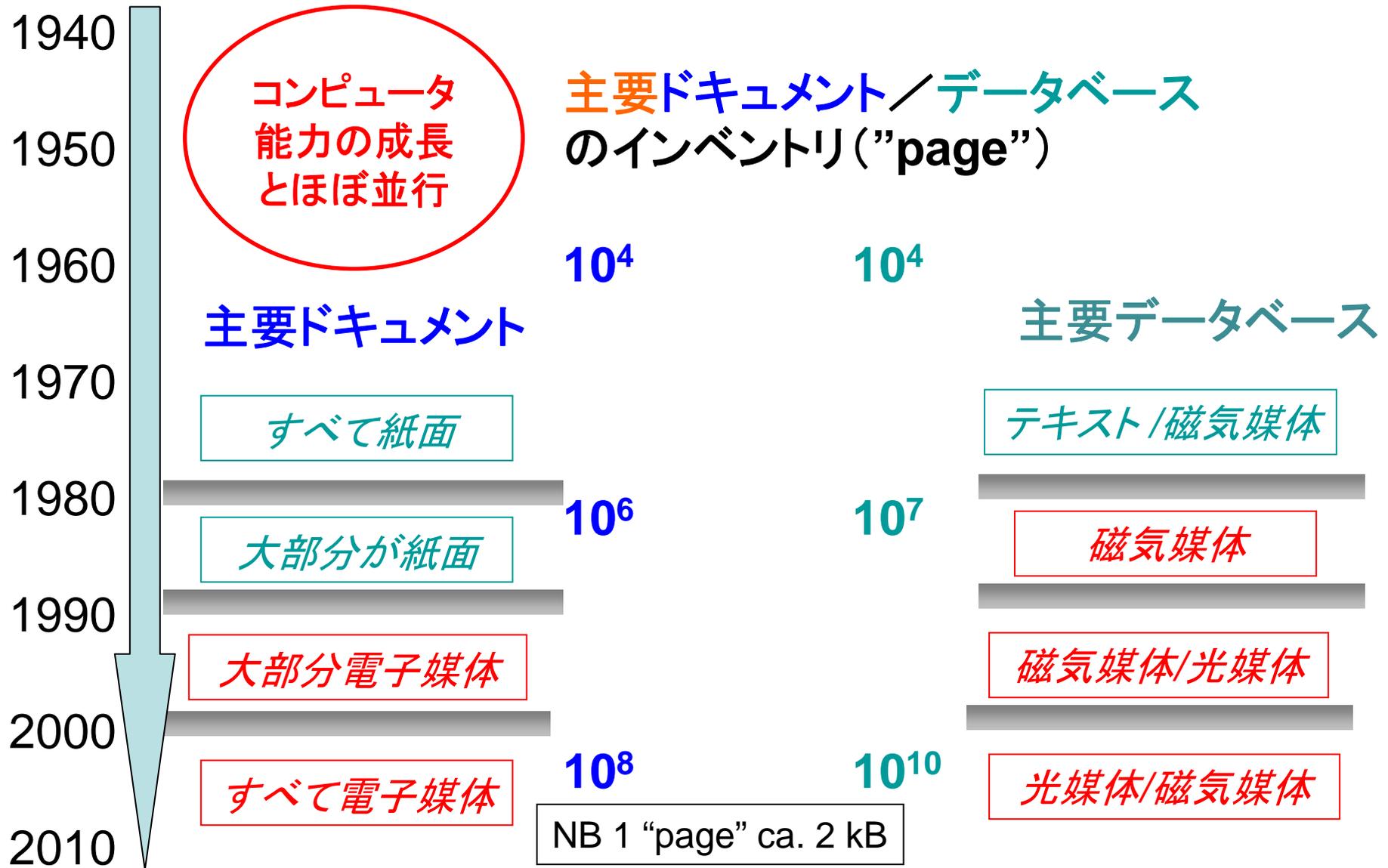
(<http://www2.sims.berkeley.edu/research/projects/how-much-info-2003/execsum.htm>)

- 情報爆発はコンピュータ能力の発展に促進され追隨
  - 放射性廃棄物処分分野では特に問題: 研究開発計画の作成にあたって事業期間の長期性に留意することが必要
- 従来型アプローチでは破綻することは明らか



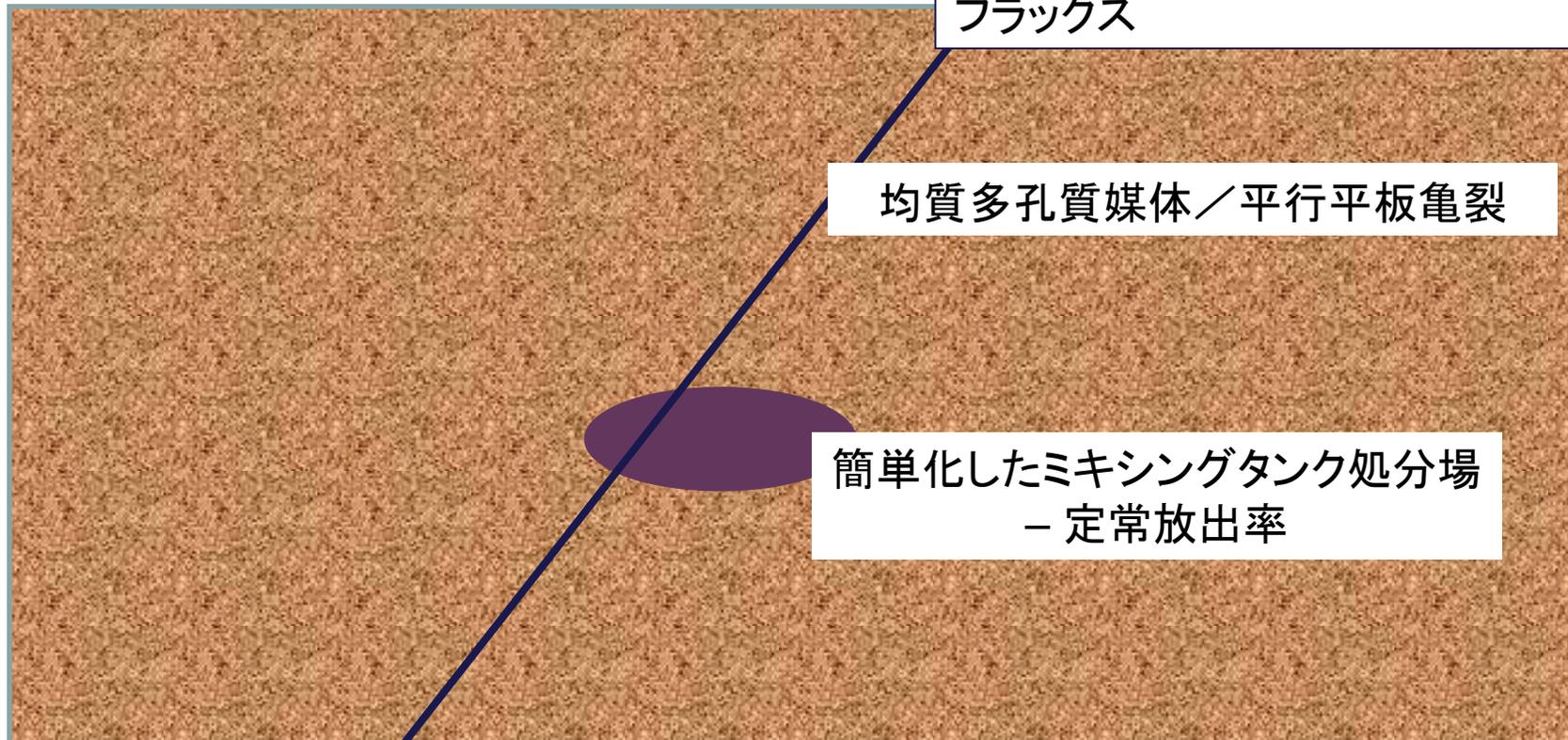


# 処分に関する知識ベースの変遷

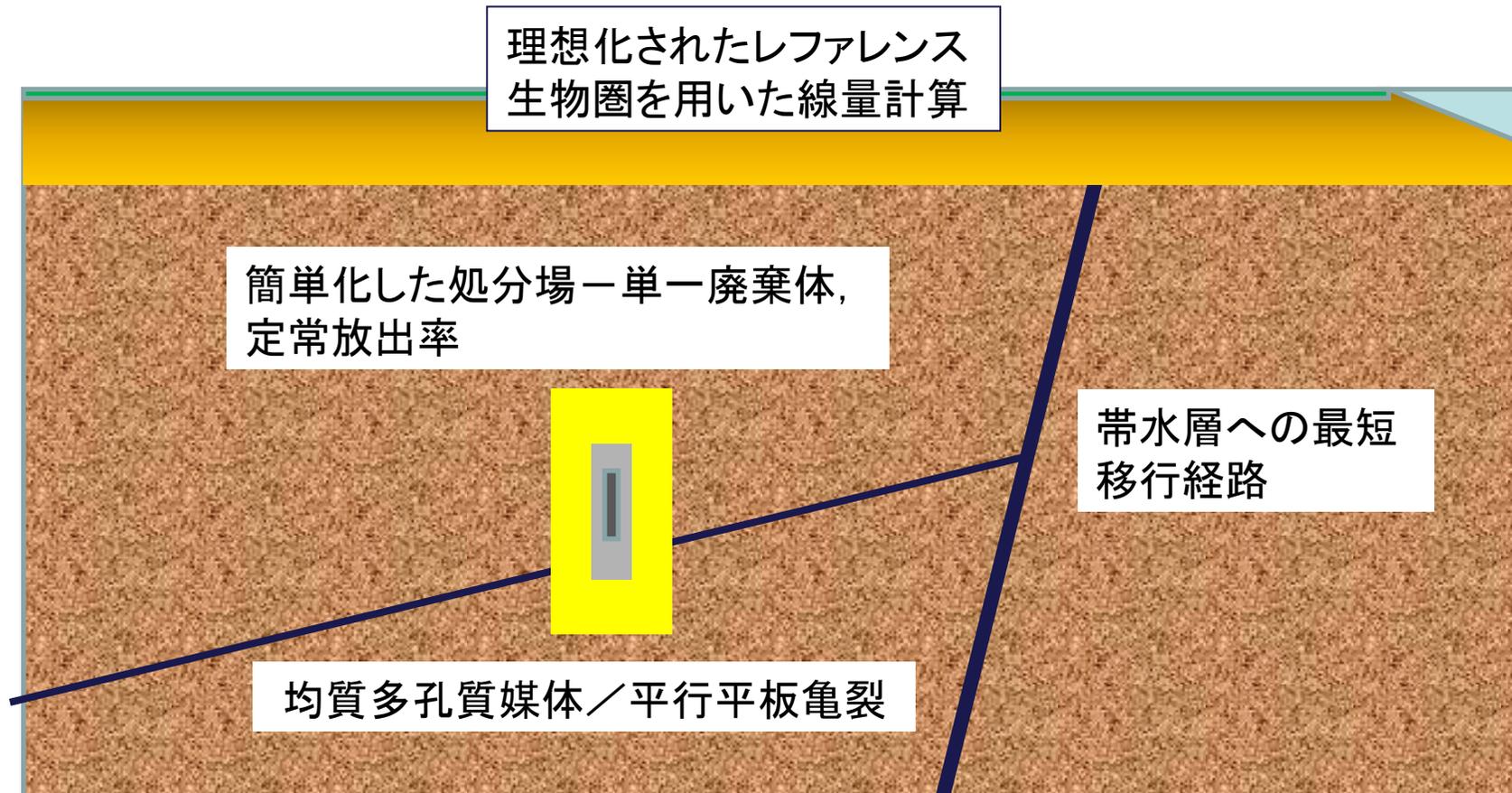


- 情報量の指数関数的増加を将来へ単純に外挿することはできないが、過去40年間の経験に基づけば、この傾向が続かないと結論づけるのは難しい
- 仮に外挿すると:
  - 2030年に処分場操業許可申請が行われると想定すると、全世界の関連する文書量は $10^{11}$  ページ、データ量で10 - 100 PB
  - 2090年の処分場閉鎖許可申請を想定すると文書量は $10^{17}$  ページ、データ量で優に1000 EB以上
- ユッカマウンテン計画webサイト:すでに約 $10^7$  ページの文書を収納
  - 印刷物の厚さ~1km (100ページで厚さ約1 cm)
  - 関連する生データを印刷すると、その約100倍
- $10^{11}$  ページ – 10,000 km, 関連する生データを含めば月まで届く?

- 1D, 定常状態, 解析解
- 極少数のシナリオ, 定性的議論
- 出力: 定常値フラックス (pCi/a)

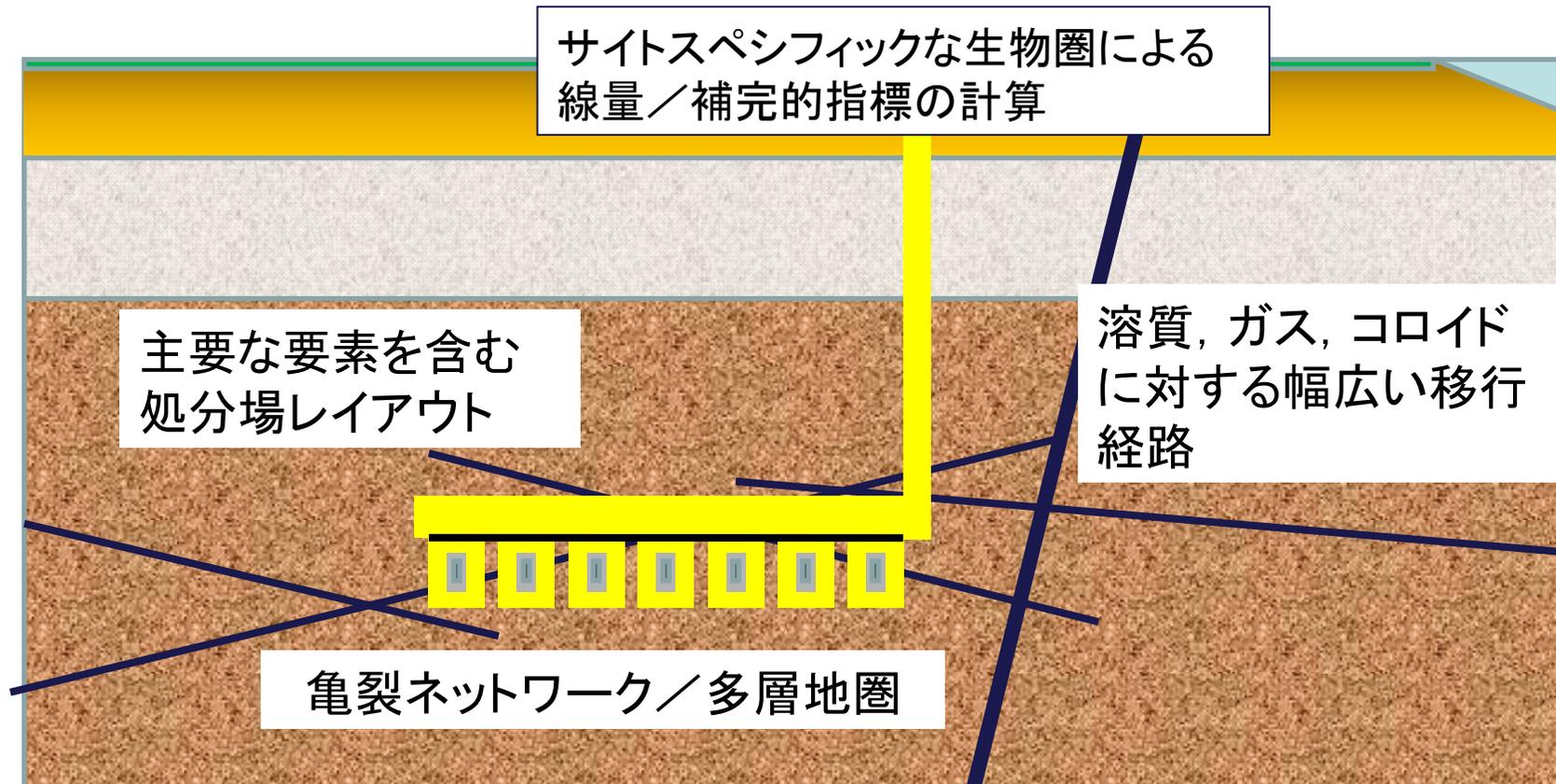


- 1 – 2D, 数値解法 (大部分のパラメータは時間に対して一定)
- 一連のシナリオを評価, (半)定量的
- 出力: 線量/リスクの時間変化 ( $f(t)$ )



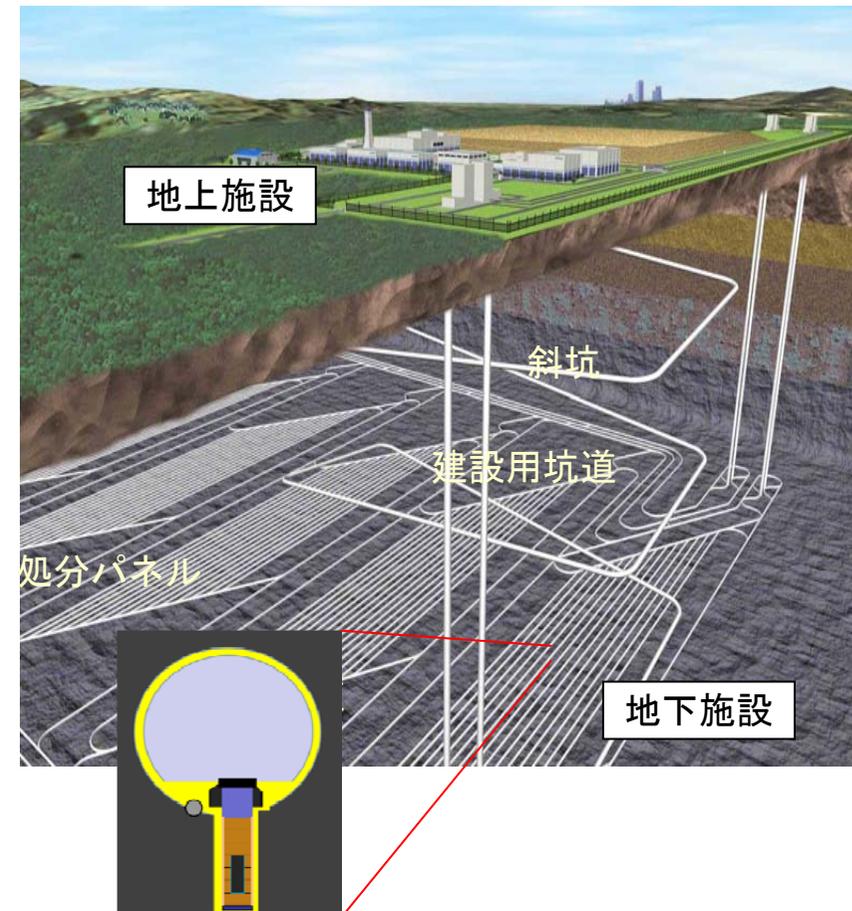
## 統合プロセスの複雑化：現在の安全評価

- 入れ子方式3D, 数値解法(いくつかのパラメータは時間依存, 段階的変化)
- 幅広いシナリオ, 定量的評価
- 影響要因を考慮した複雑なプロセスの検討(コロイド, 微生物, ガス....)
- 操業時品質管理と安全性
- 出力:線量, リスク, 補完的指標(フラックス, 濃度, バリア内分布, ....)



- 完全な統合3D, 重要な現象すべてを評価
- 地質環境の時間的変遷を評価
- すべての関連情報とハイパーリンクしたインタラクティブ・ヴァーチャル・リアリティ
- 出力: 安全性, 環境影響, ロジスティクス, コスト, etcの統合情報

- サイトスペシフィックな地質環境総合情報との統合化
- 外的な擾乱を考慮した操業時評価
- すべての影響要因(コロイド, 微生物, ガス, ....)の完全な統合化
- すべての処分場構成要素の考慮(材料, 3D分布)
- すべてのパラメータやプロセスに関する現実的な時間変化の考慮
- 時間的変遷を表現したシナリオ

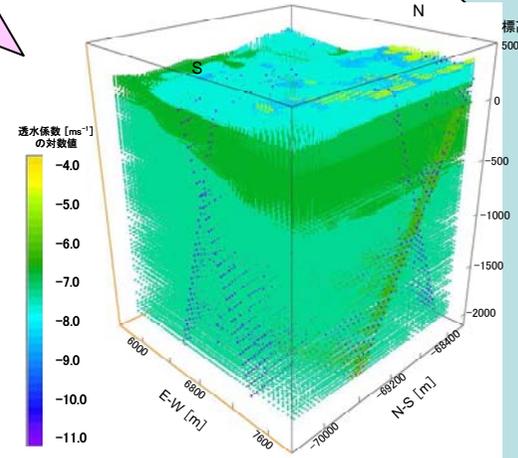
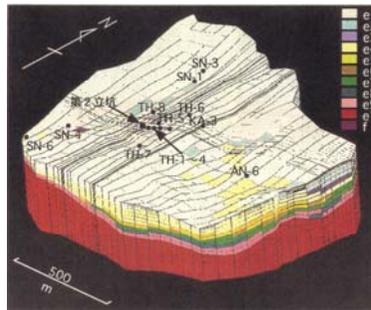
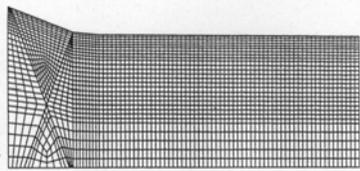


**Information Explosion !!**

「第2次取りまとめ」  
の知識の例

「H17取りまとめ」  
の知識の例

「第1次取りまとめ」  
の知識の例



- ・仮想モデルによる水理地質構造モデル(2次元)
- ・Kd値：約5,000

- ・立坑掘削影響試験(～深度約200m)の地質環境データを用いた水理地質構造モデル(3次元)
- ・Kd値：約19,000

- ・地下研究施設(～深度1,000m)の地質環境データを用いた水理地質構造モデル(3次元)
- ・Kd値：約21,000

地層処分  
研究開始

1976

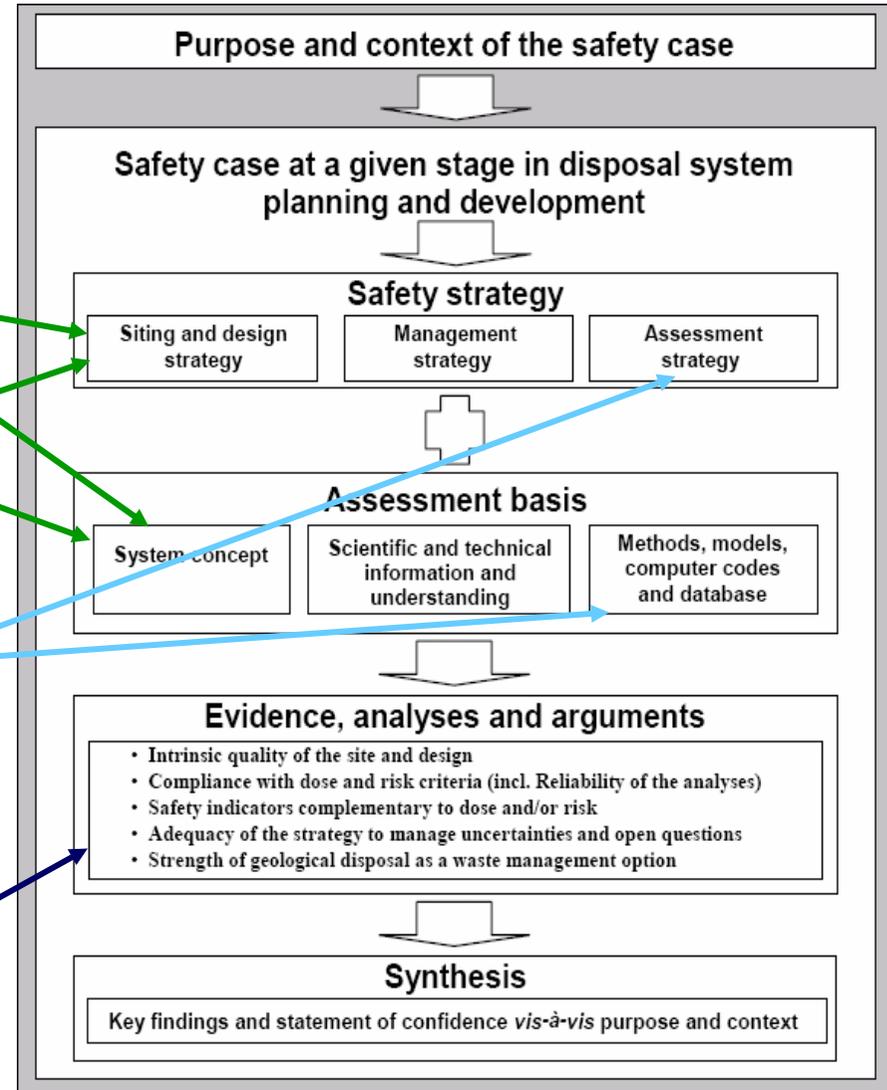
1992

2000

2005

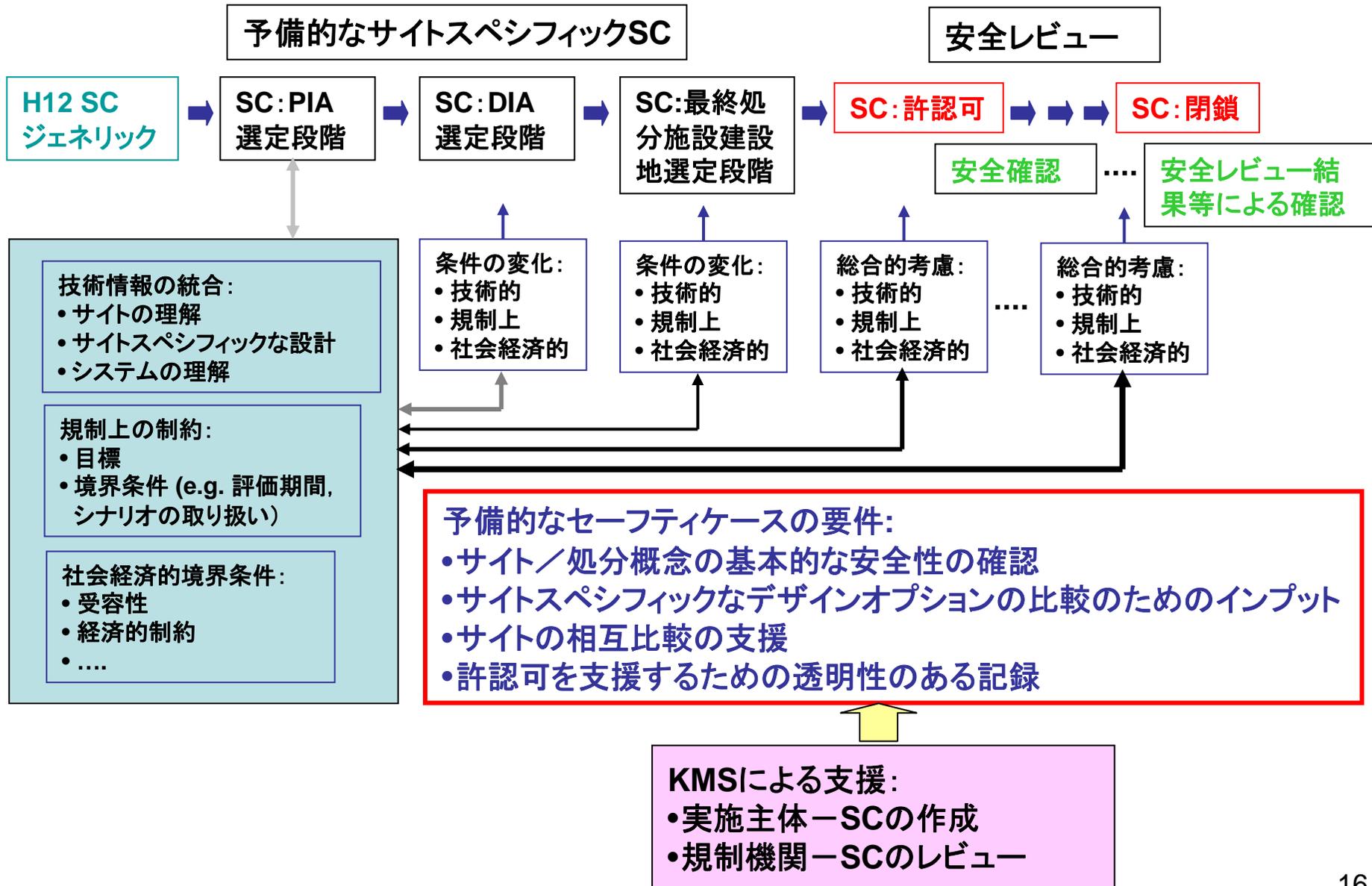
# セーフティケースとは？

- 多様な論拠に基づく地層処分システムの長期的安全の主張及びその信頼性の評価
- 与えられた前提条件(対応する意思決定の種類、安全基準、技術基準など)の下でセーフティケースに含めるべき論拠の要件
  - 適切なサイトが選定されていること
    - 地質環境の長期安定性
    - 好ましい地質環境特性(還元性・小さな地下水流量と流速)
  - 処分場が適切に設計されていること
    - 適切な設計思想(多重バリア、頑健性、安全裕度、品質管理、経験の豊富な材料の使用、経済性)
    - 建設・操業・閉鎖技術の実現可能性
  - 信頼できる安全評価手法を用いていること
  - 求められるレベルの安全性を有していること
    - 長期的安全性が基準を満足すること
    - 不確実性を考慮した安全性の補完的説明
    - 閉鎖前安全性



- 段階的に進められる計画における意思決定の材料
- 研究開発課題の抽出及び重要度分類
- 多様なステークホルダー間の合意形成のためのプラットフォーム
- 関連する複数の領域における個々の研究開発成果の統合

# セーフティケースの段階的進展とKMS



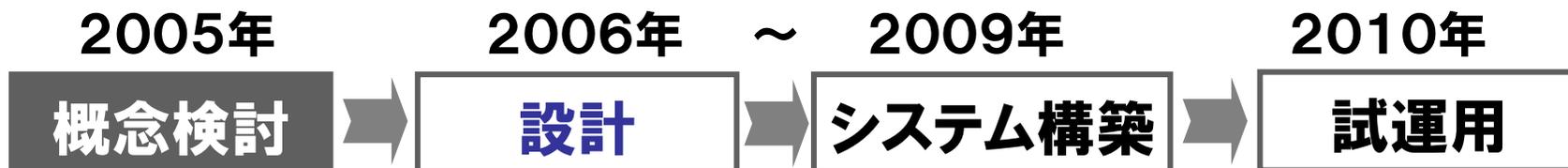


## セーフティケースをターゲットとした 知識マネジメントの要件

- セーフティケースと意思決定の履歴管理(1)
- 安全性に関する新たな論拠の作成(2)
  - 既存の知識の新たな利用方法の提示
  - 論拠となり得る仮説の生成及び検証
- 現状の知識におけるギャップの発見と解決策の提示(2)
  - セーフティケースに対する反論への危機管理
  - 科学的見解の相違への対処(相違点の解消、見解の相違によって安全性が左右されないようなシステムの採用など)
- ステークホルダー間のコミュニケーションの促進(3)
  - 規制側と実施主体
  - 異分野の専門家間
  - 専門家と非専門家
- 理解促進のための知識の普及(3)
  - 人材育成
  - 非専門家のリテラシーの向上(情報の非対称性の低減)
  - 異分野の専門知識の学習
- 学際的知識の統合(4)
  - 概念や用語の統一化
  - 分野間のインターフェイスの明確化

- システム設計の基本的アプローチ
  - 設計の主要な要素は**マネジメント機能**と**知識ベース**
  - **組織論的方法論**と**インテリジェント手法**のベストミックス
    - 知識の内容やマネジメント機能に応じた適用区分
    - 知識工学・人工知能技術を利用したインテリジェント化
    - 既存のDBやパブリックドメイン&オープンソースのソフトウェアを活用

## 2010年に知識ベースのプロトタイプを公開

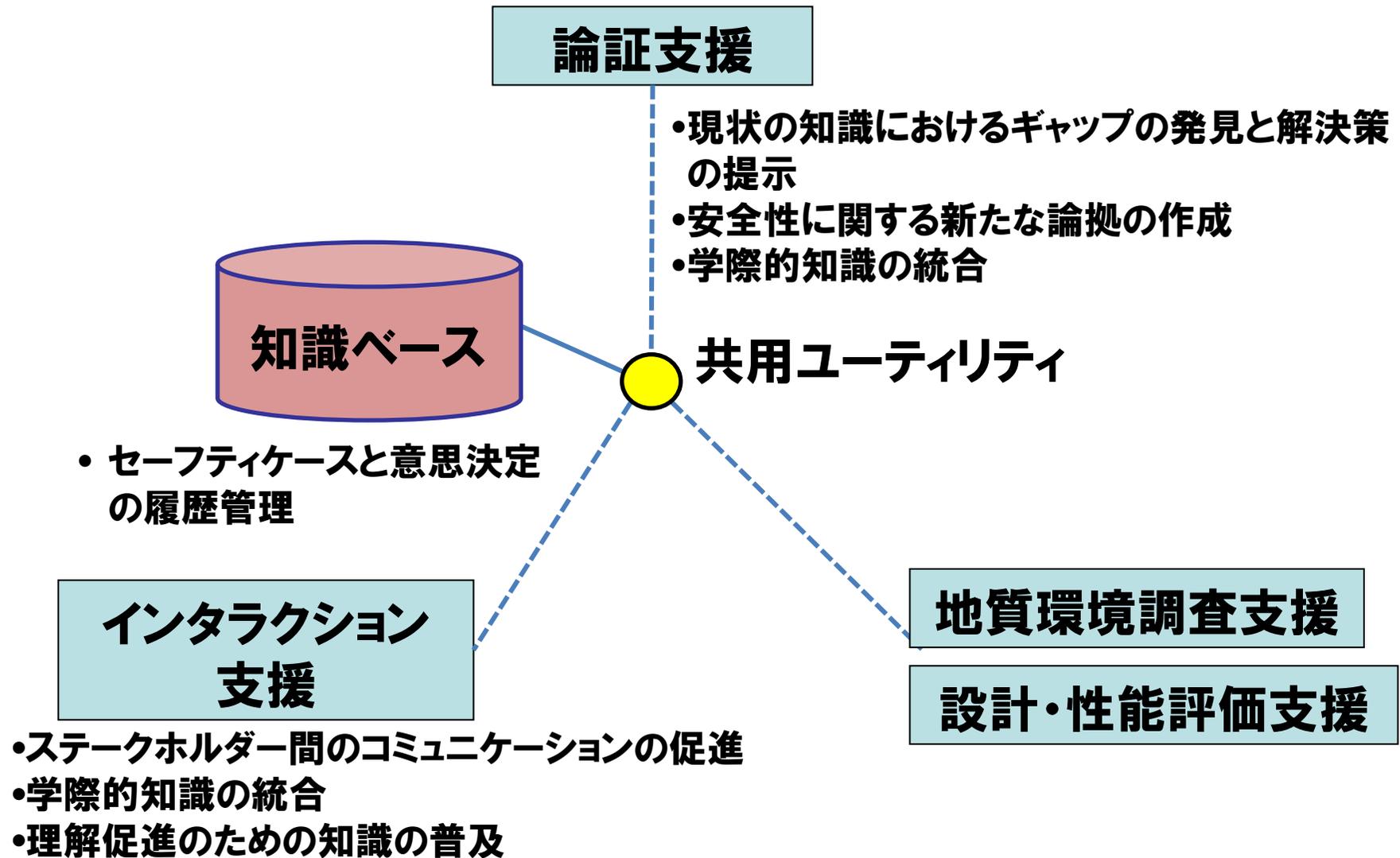




# 知識マネジメントの要素

知識の形態	マネジメント機能	内容
データ	データマネジメント	<ul style="list-style-type: none"><li>- 生データ(内部)</li><li>- 抽出データ(外部作業用)</li><li>- 処理データ</li></ul>
ドキュメント	ドキュメントマネジメント	<ul style="list-style-type: none"><li>- 作成文書</li><li>- 外部で作成された主要文書</li></ul>
ソフトウェア	ソフトウェアマネジメント	<ul style="list-style-type: none"><li>- 関連するすべてのコード/データベースのアーカイブ</li><li>- マニュアル&amp;ハンドブックのアーカイブ</li><li>- 関連する出力のアーカイブ</li></ul>
経験・ノウハウ (方法論)	リソースマネジメント	<ul style="list-style-type: none"><li>- 手順書&amp;ガイドブック</li><li>- エキスパートシステム</li><li>- トレーニング資料</li></ul>
統合化した知識	知識統合	<ul style="list-style-type: none"><li>- 経験をつんだ統合チーム</li><li>- エキスパートシステム</li></ul>
ガイダンス	知識コーディネーション	<ul style="list-style-type: none"><li>- 経験をつんだ調整チーム</li></ul>
プレゼンテーション素材	ユーザー / 生産者の対話	<ul style="list-style-type: none"><li>- ユーザーフレンドリ・インターフェース(対話を可能とするインタラクティブな機能)</li></ul>

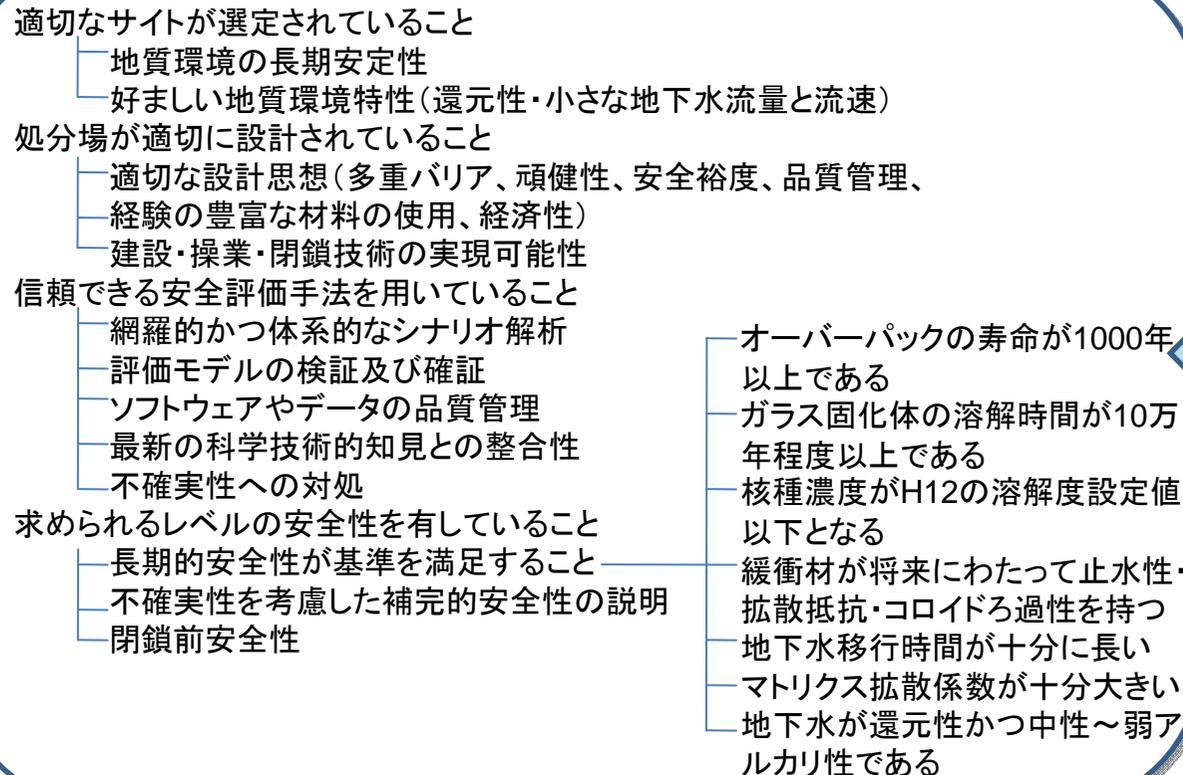
朱書きは部分的ではあっても先進的なITの適用が可能と考えられる項目



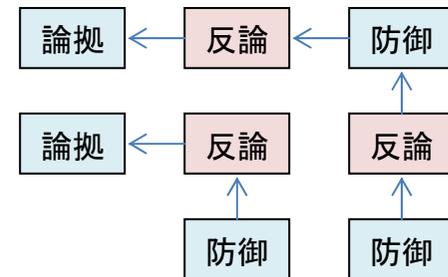
## 討論(argumentation)モデルによるセーフティケースの表現

- 討論の形式により論点を浮き彫りにしつつ内容を深化
- セーフティケースの要件に基づき討論すべき項目を構造化
- 補強すべき知識の明確化

### セーフティケースの要件の階層構造



### 個々の要件の成立性に関する討論モデル



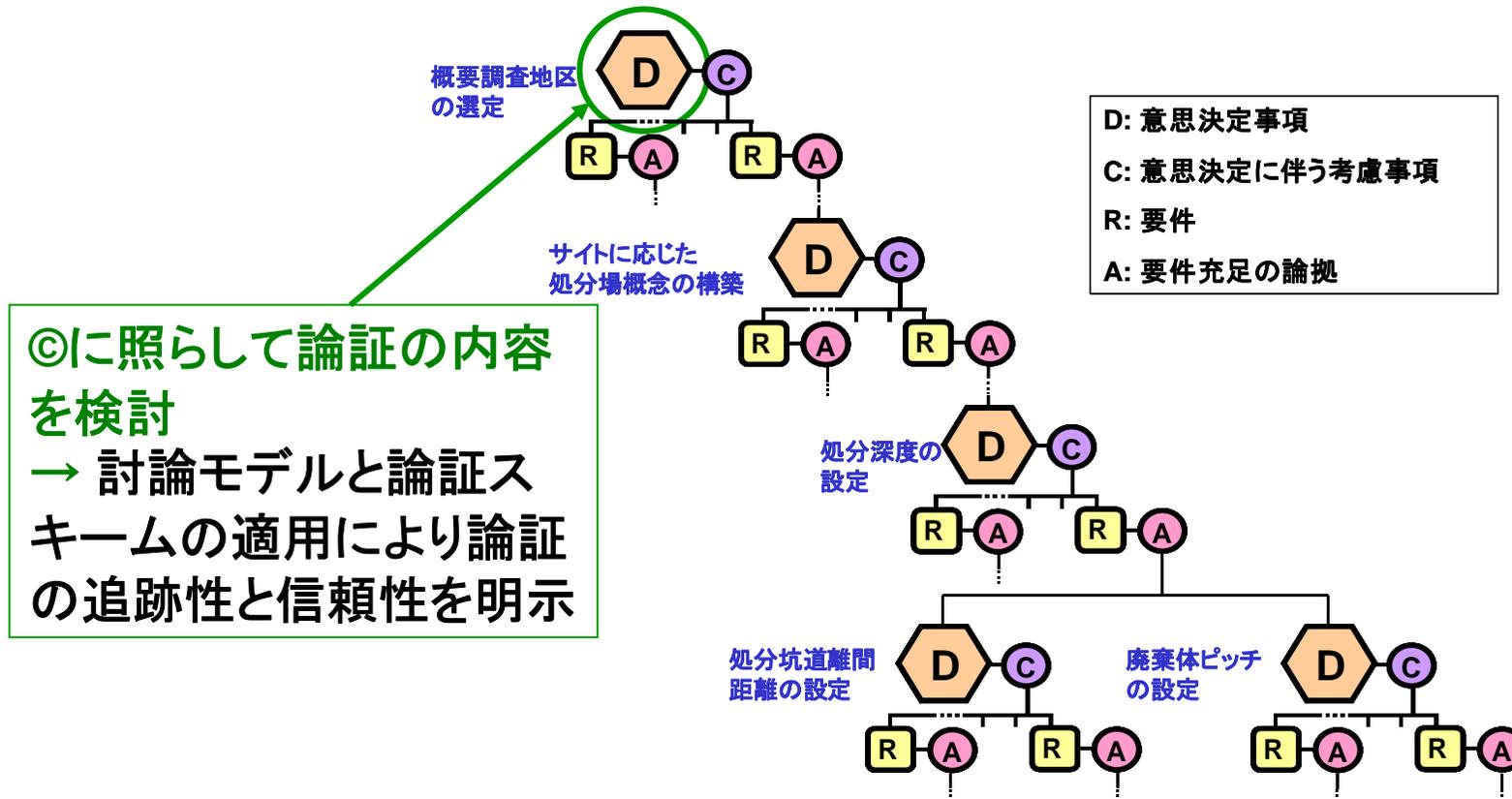
### 論証スキームの利用

- 有効とみなすことのできる論証の様式を論証スキームとして類型化
  - 類型化の視点の例(頑健性、保守性、類似性、網羅性など)
  - それぞれの類型において論証の有効性を確認するための留意点(critical questions)を予め抽出
- 論証スキームを用いることの効用
  - 意見や価値観あるいは文化的背景の異なるステークホルダー間の討論における共通のルールを規定(討論モデルが論証されていることを判断する基準)
  - 各論証の類型に対するcritical questionsが予め提示されているため討論の品質管理を体系的に行うことが可能(討論モデルの信頼性向上)
  - 国内外の既存のセーフティケースにおける論証事例を整理し再利用する際の事例ベースの管理単位を提供

論証の種類		Critical questions
保守性	証拠(データ)の不確実性に対して十分な裕度を以て主張が成立する	<ul style="list-style-type: none"> <li>データのばらつきが考慮されているか？</li> <li>測定誤差が考慮されているか？</li> <li>経験や知識の不足に起因する不確実性が考慮されているか？</li> <li>複数の不確実性要因の相乗効果が考慮されているか？</li> </ul>
頑健性	システムやその構成要素の機能が不確実な要因に左右されずに発揮される	<ul style="list-style-type: none"> <li>全ての不確実性要因が網羅されているか？</li> <li>各不確実性要因の影響機構が適切に考慮されているか？</li> <li>複数の不確実性要因の相乗効果が考慮されているか？</li> </ul>
類似性	類似した事例で主張が成立していることから、当該事例でも成立すると言えることができる	<ul style="list-style-type: none"> <li>着目すべき特性について類似していると言えるか？</li> <li>類似した事例での主張の成立性は確かなものか？</li> <li>類似した他の事例で同じ主張が成立していないものはないか？</li> </ul>
網羅性	想定し得るすべての状況において主張が成立する(反例が見いだされない)	<ul style="list-style-type: none"> <li>十分広い範囲において反例の探索が行われているか？</li> <li>想定し得る状況での主張の成立性は確かなものか？</li> </ul>

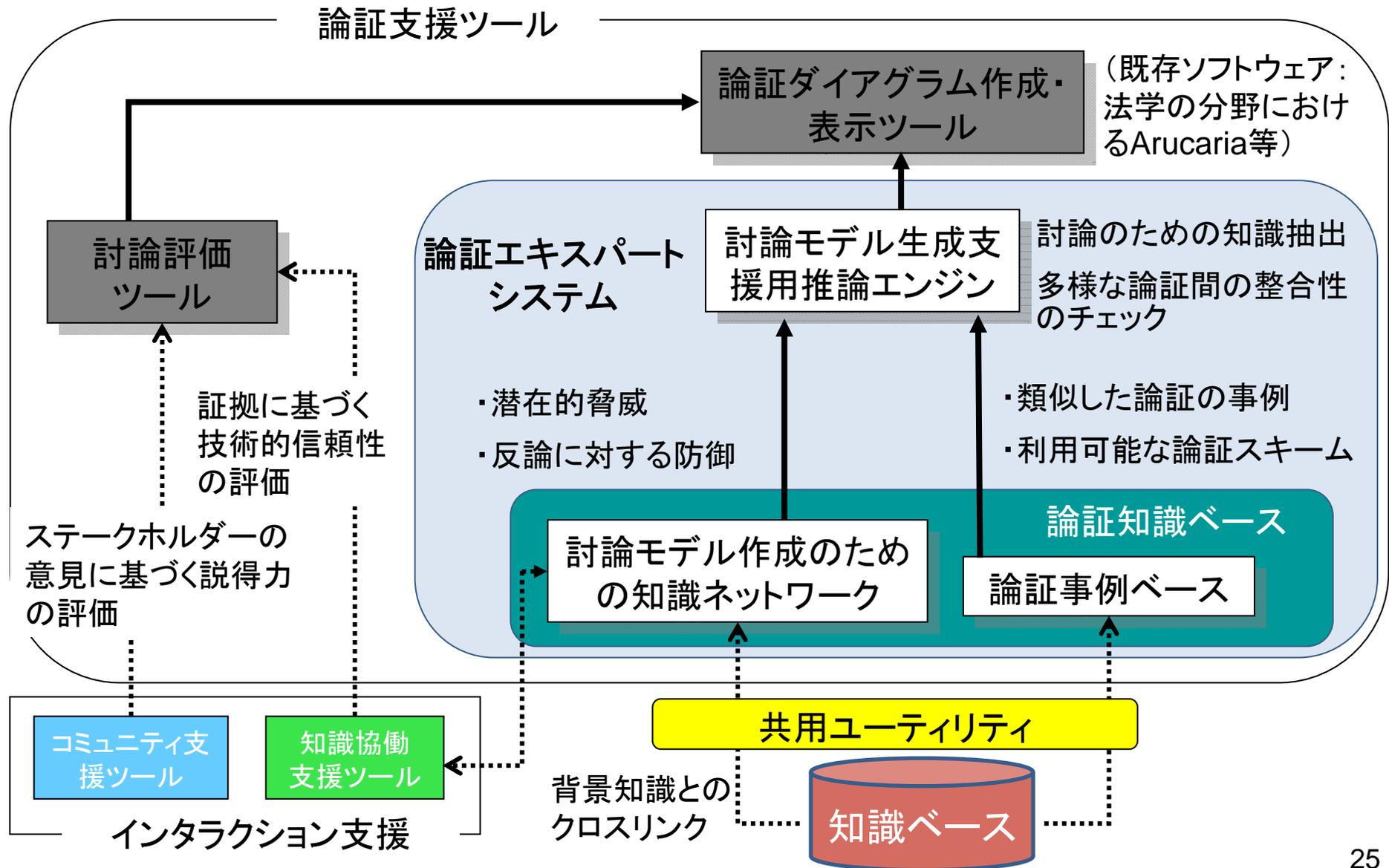
## NSA: NUMO構造化アプローチ (NUMO-TR-07-01)

- 意思決定における要件管理
- KMSにおける論証は意思決定の判断根拠を提供



「意思決定の構造」の一例

# 論証支援ツールの構成



- セーフティケースにおける論拠(あるいは反論)となり得る知識間のリンクの意味を明確にしたネットワーク(ソフトウェア **KNetwork: ClaiMaker method** (英国で開発され十年近い運用経験) の利用)

The screenshot shows the ClaiMaker software interface. At the top left, a 'Link' dialog box lists relationship types and their weights. At the top right, a 'Concept' dialog box shows details for a concept about volcano clusters. The main window displays a network diagram with nodes and arrows representing relationships between concepts.

**リンク (Link) Dialog Box:**

関係の表現	極性と重み
～を立証する	+2
～を反駁する	-2
～の証拠となる	+1
～に反する証拠となる	-1
～と一致する	+1
～と不一致である	-1
～と整合的である	+1
～と不整合である	-1

**コンセプト (Concept) Dialog Box:**

タイトル: 火山の分布はクラスターを形成する

説明: 標高火山では複数の火山が集中してクラスターを形成する傾向がある

証拠: 概ね支持するが例外あり

専門家のコンセンサス: 原理-原則

一般的認知度: 確立された知識, 議論あり, 少数意見

参考文献: Martin et al. 2003

**ネットワーク図 (Network Diagram):**

- Node 1: 火山に近いほど将来の火山活動の確率が高い
- Node 2: 火山に近いほど確率が高いとは限らない
- Node 3: 火山の生成はマグマ溜りからの熱の拡散による
- Node 4: 火山の分布はクラスターを形成する

Relationships (Arrows):

- Node 1 to Node 2: 反駁する (Refutes)
- Node 2 to Node 1: 反駁する (Refutes)
- Node 2 to Node 3: 原因となる (Cause)
- Node 3 to Node 4: 立証する (Proves)
- Node 4 to Node 2: 反駁する (Refutes)
- Node 4 to Node 1: 証拠となる (Evidence)

クラス	関係の表現	極性と重み	
全般	～に関する	is about	+1
	～を用いる/によって可能となる	uses/applies/is enabled by	+1
	～を上回る	improves on	+2
	～を損なう/減ずる	impairs	-2
問題解決	その他の関係	other link	+1
	～に取り組む	addresses	+1
支持/異議	～を解決する	solves	+2
	～を立証する	proves	+2
	～を反駁する	refutes	-2
	～の証拠となる	is evidence for	+1
	～に反する証拠となる	is evidence against	-1
	～と一致する	agrees with	+1
因果関係	～と不一致である	disagrees with	-1
	～と整合的である	is consistent with	+1
	～と不整合である	is inconsistent with	-1
	～を予測する	predicts	+1
	～を想定する	envisages	+1
	～を引き起こす	causes	+2
類似性	～の原因となり得る	is capable of causing	+1
	～のために必要である	is prerequisite for	+1
	～を防ぐ/妨げる	prevents	-2
	～に影響を及ぼす可能性が低い	is unlikely to affect	-1
分類	～と同一である	is identical to	+2
	～と異なる	is different to	-1
	～と反対である	is the opposite of	-2
	～と問題を共有する	shares issues with	+1
	～とは無関係である	has nothing to do with	-1
	～と類似している	is analogous to	+1
分類	～と類似していない	is not analogous to	-1
	～の一部である	part of	+1
	～の一例である	examples of	+1
	～の部分集合である	subclass of	+1
	～の一部ではない	not part of	-1
分類	～の一例ではない	not example of	-1
	～の部分集合ではない	not subclass of	-1

## 論証の背景知識の体系化・共有

- 知識ネットワーク内の各論拠に含まれる重要な概念に対してはオントロジー（既存ソフトウェア：法造など）により意味や他の概念との関係を記述し、必要に応じて別ウィンドウで閲覧可能
- 知識ベース内のデジタルライブラリにある参考文献（HTML）とクロスリンク

**コンセプト**

タイトル: 火山の分布はクラスターを形成する

アイコン:

説明: 複成火山では複数の火山が集中して分布する傾向がある

証拠: 概ね支持するが例外あり

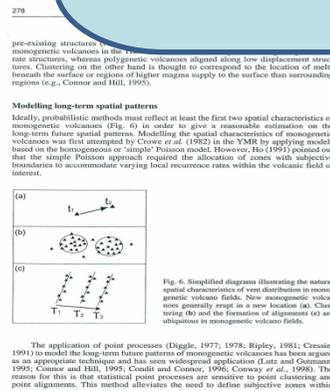
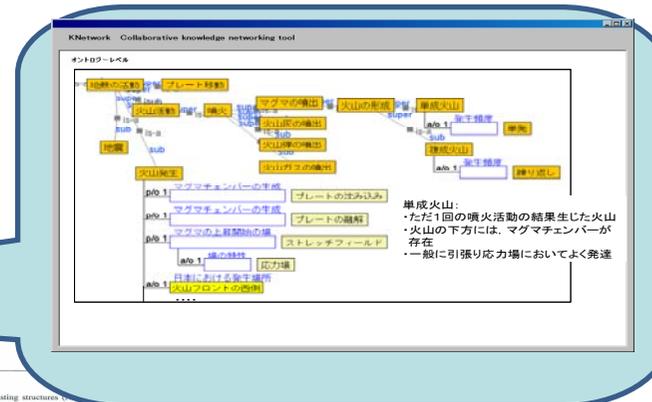
専門家のコンセンサス: 原理・原則  
 確立された知識  
**大多数が支持**  
 異論あり  
 少数意見

一般的認知度: 同上

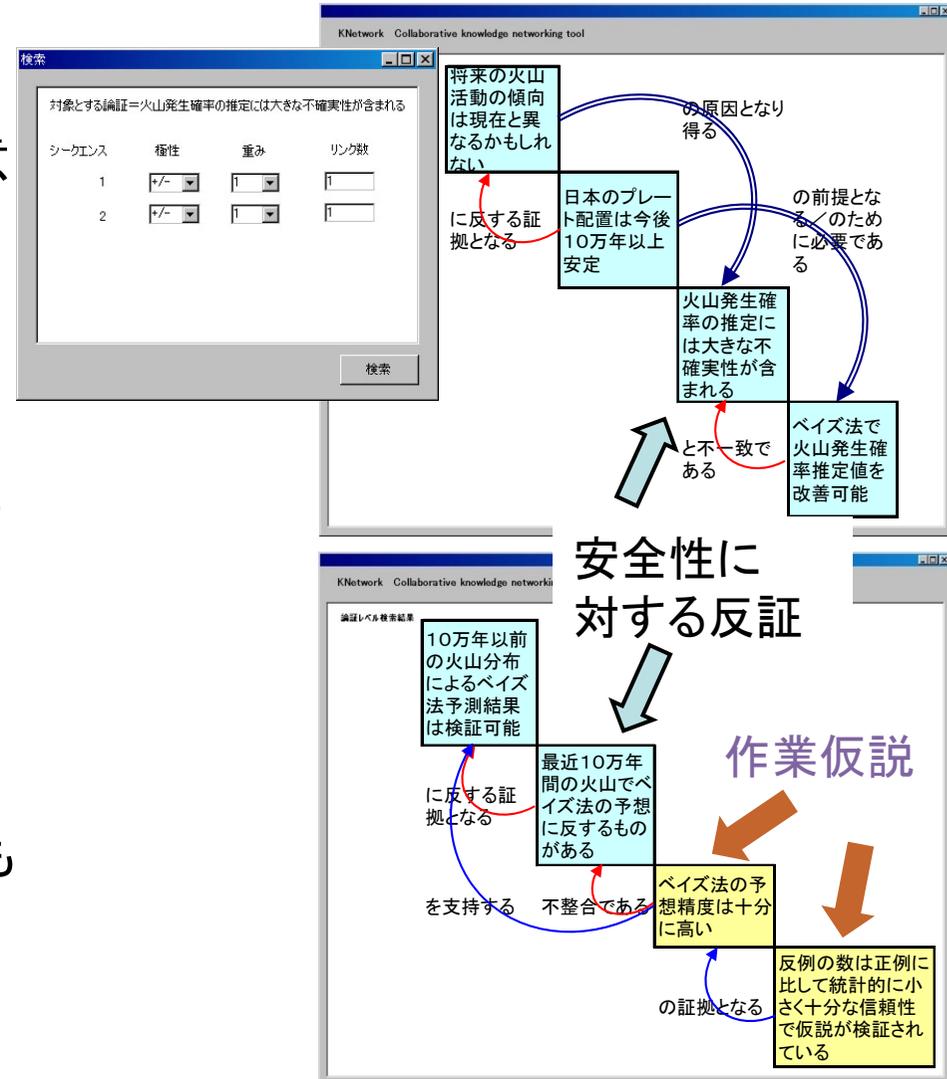
参考文献: Martin et. al. 2003

言語: 仮説

OK キャンセル

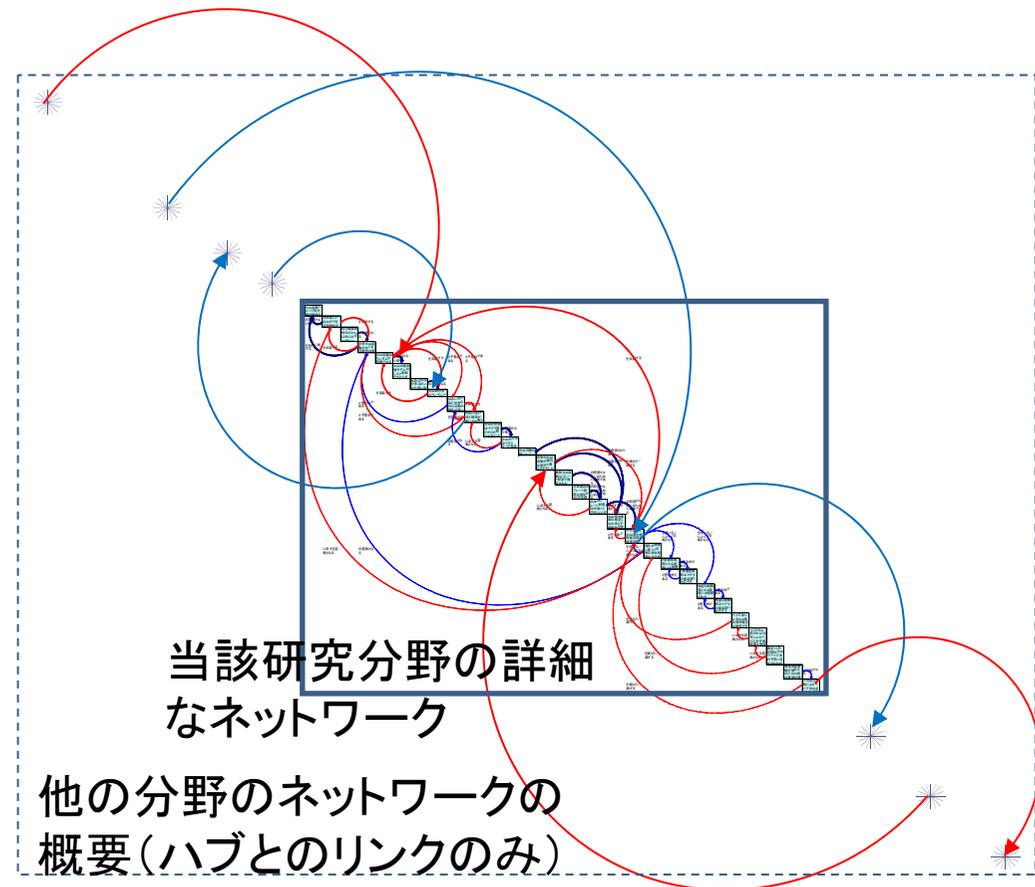


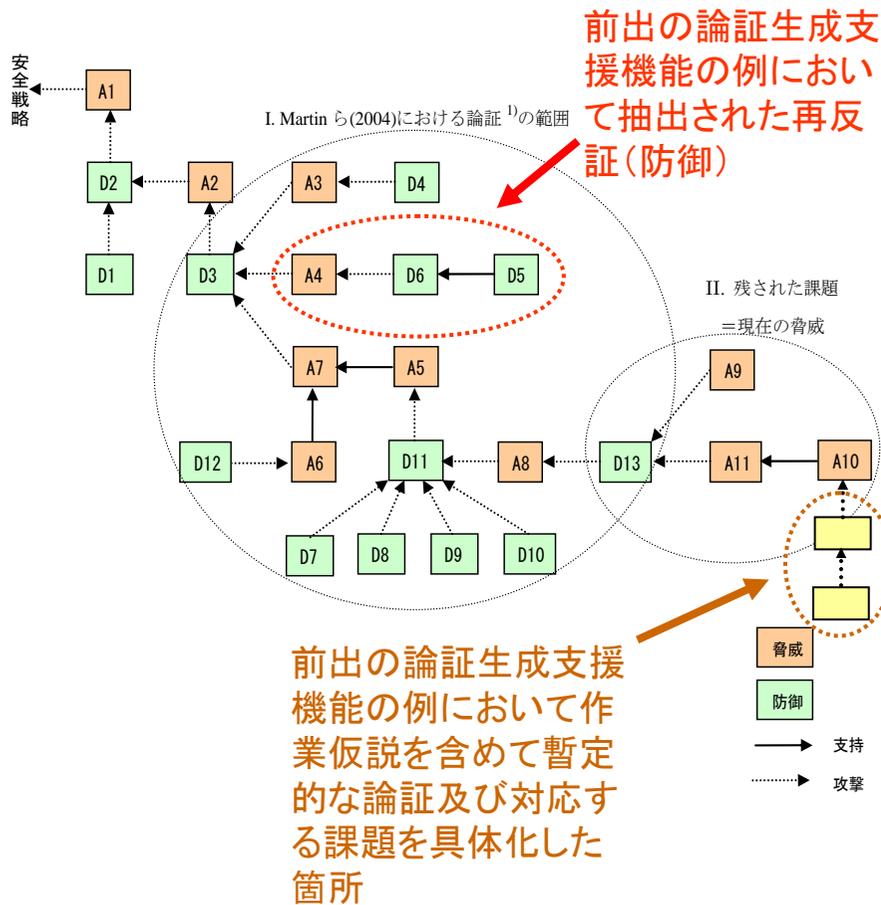
- ある論拠あるいは反論(例:火山の発生確率には大きな不確実性が含まれる)に関連する知識をリンクの意味を特定して検索することにより、
  - 対象とする論拠に対する反駁や矛盾する証拠
  - 対象とする論拠を支持する論拠に対する反駁や矛盾する証拠等を自動的に抽出
- 既に確立された知識のみではなく仮説もネットワークに含めておくことにより、今後の研究開発の進展を前提とした暫定的な論証を生成するとともに必要な研究課題を明確化する



## スモールネットワーク理論に基づくアプローチ

- 当該専門分野の知識ネットワークの詳細に加えて関連する他分野ではハブ(多くの知識要素とのリンクを有する知識ネットワークの中の焦点)とのリンクを優先的に表示・検索することにより、詳細度と網羅性を両立させる
- 多様な分野の専門家が分散してネットワーク構築できる環境が必要→webベースのシステム

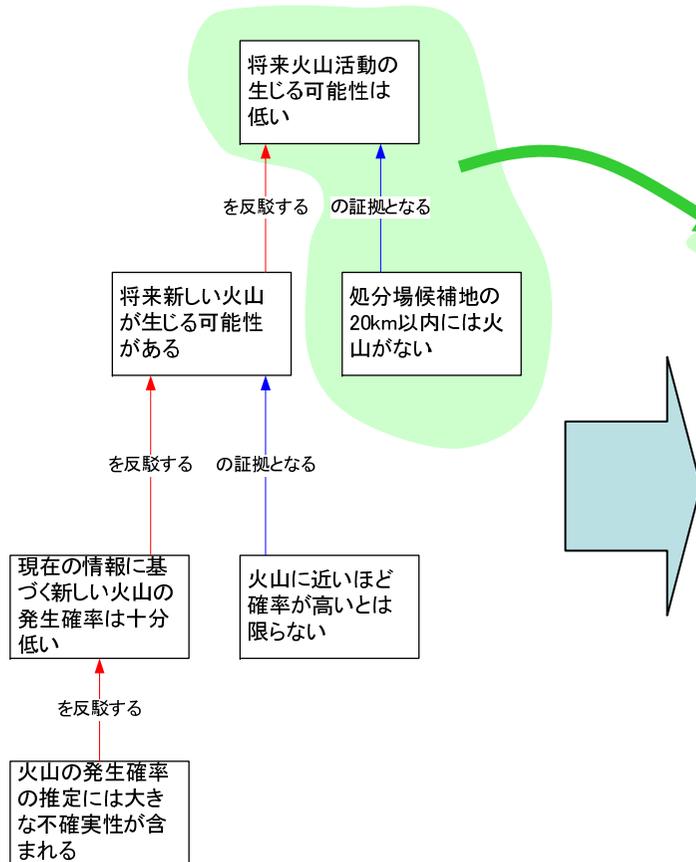




	命 題
A1	火山活動によって処分場が破壊され放射性物質が地表に戻される
A2	将来新しい火山ができる
A3	火山活動はランダムな事象ではなく確率的な評価はリスクの希釈につながる
A4	既存の火山に近いほど新しい火山の発生確率が高いと仮定する根拠が無い
A5	火山の数は限られている
A6	将来の火山活動の傾向は現在とは異なる可能性がある
A7	火山の発生確率の推定には大きな不確実性が含まれる
A8	ベイズ法による火山発生確率の予測の正しさを確かめることができない
A9	最近 10 万年間に発生した新しい火山の中にはベイズ法の予想とは反するものがある
A10	多くの物理探査情報を反映して更新した予想ほど各地域での火山発生確率が增大している
A11	不完全な情報に基づくベイズ法の予測は非保守的である
D1	当該地域の半径 20km 以内には火山がない
D2	火山活動が生じる可能性は低い
D3	現在の火山の分布から推定される新しい火山の発生確率は十分低い
D4	世界の火山の分布はガンマ分布に従いランダムなものであることが示されている
D5	火山の生成はマグマ溜りから地表への熱の拡散によるものである
D6	火山の空間分布はクラスターを形成する
D7	P 波速度異常と火山の密度には顕著な相関がある
D8	P 波速度の異常はマグマの高温部に対応している
D9	地温勾配の異常と火山の密度には顕著な相関がある
D10	地温勾配の異常はマグマの高温部に対応している
D11	物理探査の情報から尤度関数を定義してベイズの定理を用いることによって不確実性を低減することができる
D12	島弧火山活動の要因とする沈み込みプレートの性質は約 800 万年間という長期にわたって安定であり今後少なくとも 10 万年間はその傾向が継続すると考えられる
D13	過去 10 万年以前の火山分布と物理探査データに基づきベイズ法によって最近 10 万年間の火山の発生確率を求めるとこの期間に実際に新たに生じた火山の分布を良く表現できる

## 過去の論証事例における知識の再利用

### 論証ダイアグラム

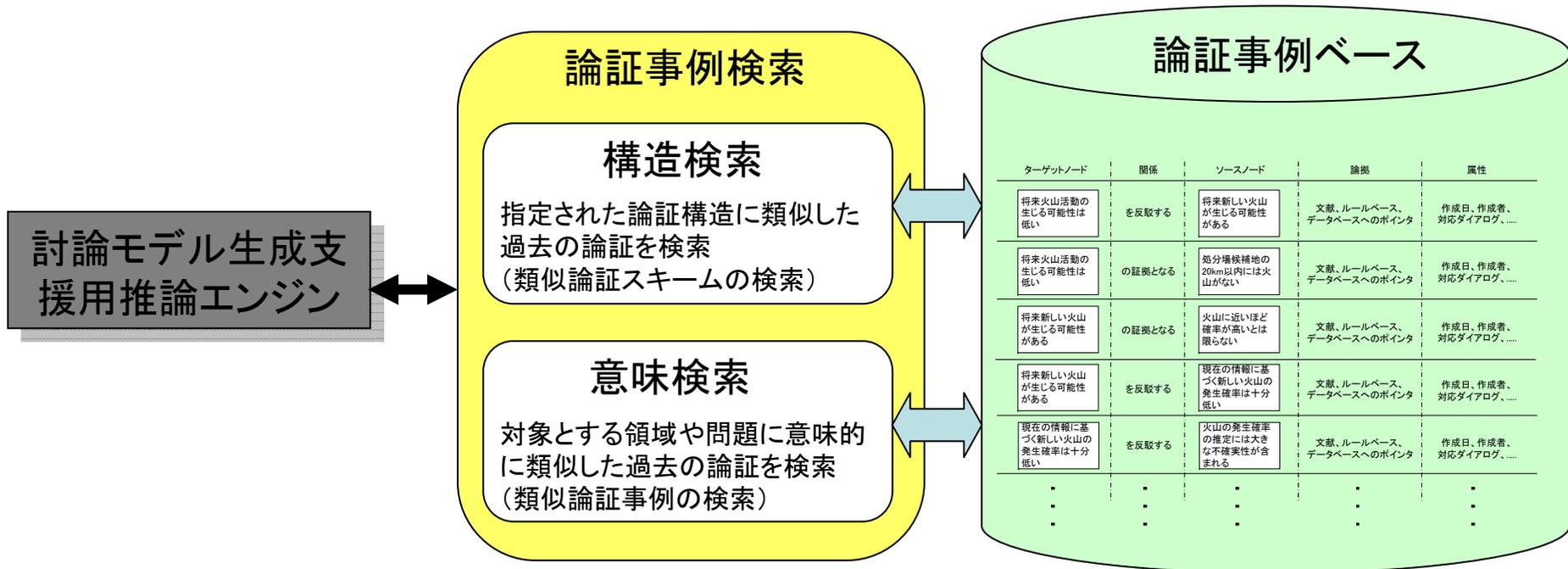


### 論証ダイアグラムのデータベース化 (論証事例ベース)

ターゲットノード	関係	ソースノード	論拠	属性
将来火山活動の生じる可能性は低い	を反駁する	将来新しい火山が生じる可能性がある	文献、ルールベース、データベースへのポイント	作成日、作成者、対応ダイアログ、.....
将来火山活動の生じる可能性は低い	の証拠となる	処分場候補地の20km以内には火山がない	文献、ルールベース、データベースへのポイント	作成日、作成者、対応ダイアログ、.....
将来新しい火山が生じる可能性がある	の証拠となる	火山に近いほど確率が高いとは限らない	文献、ルールベース、データベースへのポイント	作成日、作成者、対応ダイアログ、.....
将来新しい火山が生じる可能性がある	を反駁する	現在の情報に基づく新しい火山の発生確率は十分低い	文献、ルールベース、データベースへのポイント	作成日、作成者、対応ダイアログ、.....
現在の情報に基づく新しい火山の発生確率は十分低い	を反駁する	火山の発生確率の推定には大きな不確実性が含まれる	文献、ルールベース、データベースへのポイント	作成日、作成者、対応ダイアログ、.....
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

- 論証ダイアグラムの構成要素(ノードとリンク(関係))をタプルとして表現しデータベース化
- 類似したケースや関連する論証構造の検索に活用

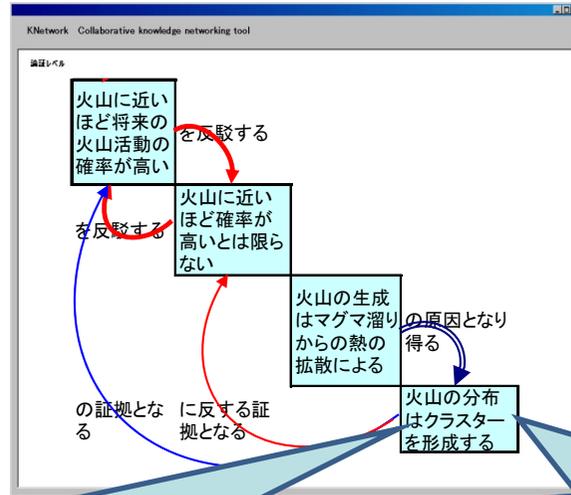
- 「討論モデル生成支援用推論エンジン」によって
  - 現在争点となっている論拠に内容的に関連する過去の論証事例
  - 現在の論証構造に類似した過去の論証スキーム
 を検索しユーザに提示



## 討論の信頼性に関する多様なステークホルダーの意見集約

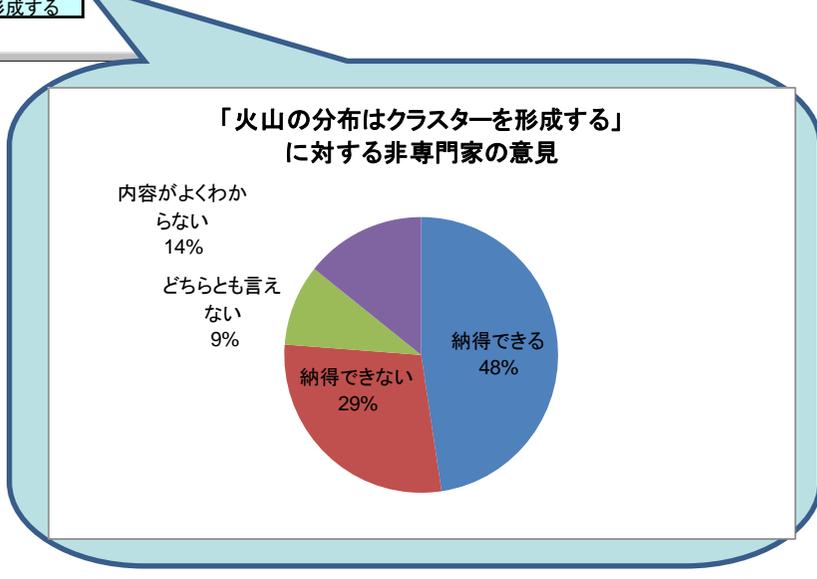
### 協働支援ツールの各機能を用いた専門家による論証の技術的信頼性評価

- ・電子掲示板による意見交換
- ・オンラインESLを用いたエビデンスに基づく信頼性評価

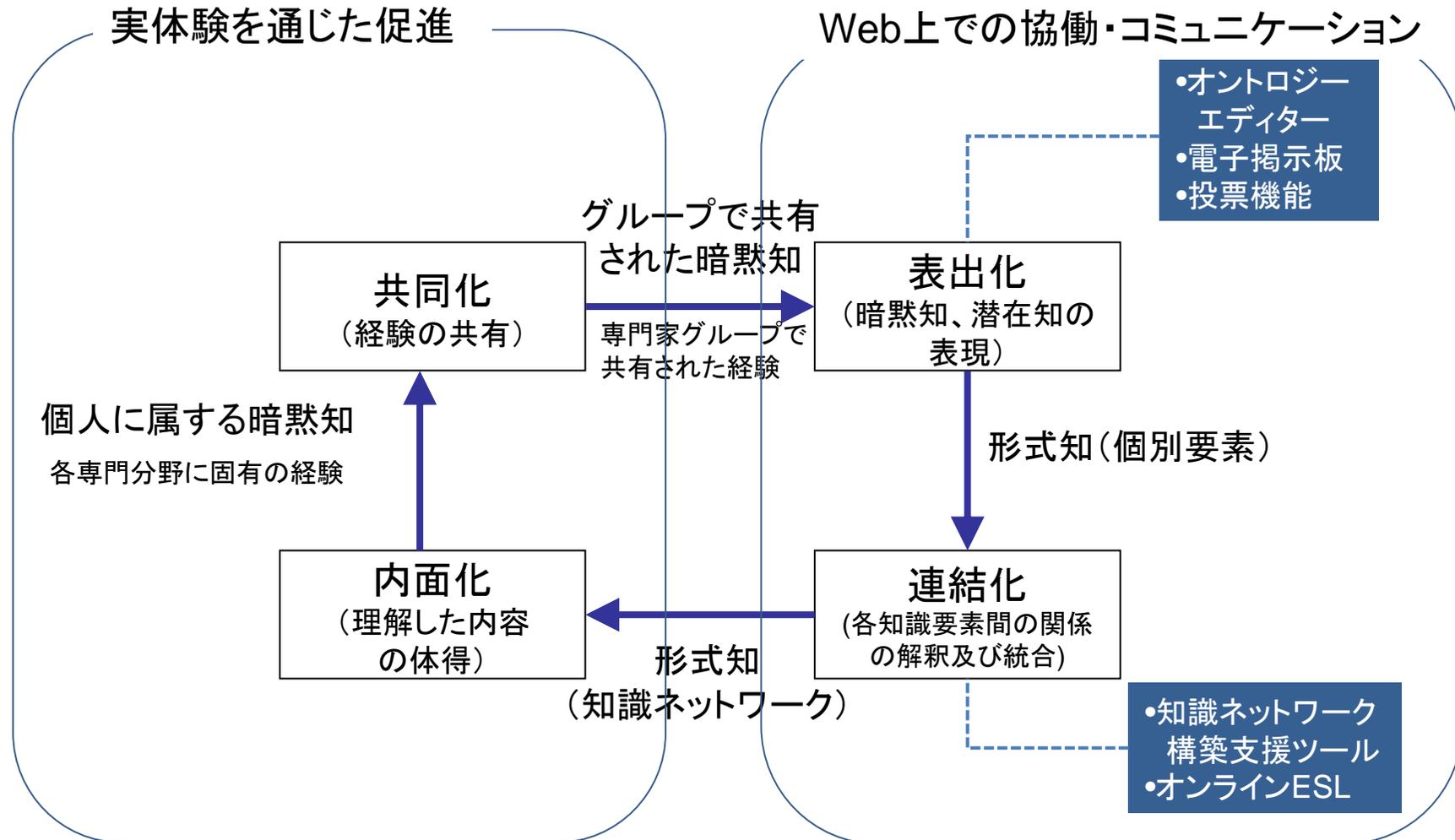


### コミュニティ支援ツールの各機能を用いた非専門家による論証に対する認識の調査

- ・電子掲示板による意見交換
- ・学習支援機能による内容理解
- ・投票機能による意見分布の表示



## 知識生成スパイラル(SECIスパイラル)の促進





# 協働支援ツール及びコミュニティ支援ツールの例

**入力画面**

**オンライン性能評価**

**出力表示**

**投票結果**

**劇場掲示板**

**専門家**

**観客掲示板**

**非専門家**

**電子掲示板**

**投票画面**

- 組織論的方法論が中心となる領域
  - スタッフのトレーニング
    - 統合チーム(知識統合)
    - 調整チーム(知識コーディネーション)
  - 知識の伝達・移転
    - 組織内・組織外
  - ピアレビュー
  - シンクタンク機能
- インテリジェント化によって支援